

ЕЛЕКТРОНІКА, РАДІОТЕХНІКА ТА ЗАСОБИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

УДК 534.3

В.С. Дідковський, О.Г. Лейко,
І.В. Кандрачук

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ПОЛІВ КРИВОЛІНІЙНИМИ АКУСТИЧНИМИ АНТЕНАМИ, УТВОРЕНИМИ З КРУГОВИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ П'ЄЗОКЕРАМІЧНИХ ПРИЙМАЧІВ ЗВУКУ

Вступ

Акустичні антени є однією з найважливіших складових частин електроакустичної апаратури, яка значною мірою визначає ефективність і потенціальні можливості цієї апаратури. Це зумовлено тим, що вони виконують не тільки функції формування звукового поля в просторі, що оточує антену [1], а й функції перетворення одних видів енергії в інші, зокрема акустомеханоелектричного перетворення в режимі прийому [2]. Саме необхідність одночасного виконання цих двох функцій при значній фізичній складності процесів, які покладені в основу цих функцій, зумовлює потребу безперервного пошуку та вдосконалення як модельних уявлень про перетворювачі та антени, так і методів розрахунків полів різної фізичної природи — акустичних, механічних та електричних, що формуються ними.

У розвитку підходів до розрахунку цих полів умовно можна виділити кілька етапів. Найбільш простим є підхід, який будується на допущенні, що перетворювачі антен є точковими і прозорими для звуку [3]. При розрахунках звукових полів такий підхід може застосовуватись лише для систем перетворювачів, які малі порівняно з довжиною хвилі робочої частоти. Механічні і електричні поля антен і перетворювачів при цьому не обчислюються.

Але більшість акустичних антен утворюється з перетворювачів та інших елементів, зокрема акустичних екранів, які, по-перше, є непрозорими для звуку і, по-друге, мають розміри, порівнянні з довжиною робочої хвилі. Тому властивості антен та звукових полів, що формуються ними, значною мірою визначаються взаємодією елементів антен по звуковому полю. Вона зумовлена багаторазовим відбиттям звукових хвиль, що випромінюються перетворювачами або розсіюються екранами, від інших елементів антен. Саме наявність цієї взає-

модії стимулювала розвиток другого етапу в розрахунках звукового поля антен, обов'язковим елементом якої стало врахування інформації про характер граничних умов, що реалізуються на поверхнях складових частин антен — розподілу коливальної швидкості на поверхнях перетворювачів та величини прозорості для звуку акустичних екранів антен [1, 4, 5].

Однак щодо акустичних антен, утворених з п'єзоактивних елементів — п'єзокерамічних перетворювачів, виникнення на поверхнях перетворювачів додаткових зусиль, зумовлених багаторазовим відбиттям хвиль, викликає появу відповідних електричних сигналів на виході перетворювачів. Ці сигнали можуть виявитися істотними при роботі антен у діапазоні частот, який вміщує в собі власні частоти електрично активних мод коливальних перетворювачів. У зв'язку з цим виникає необхідність у розвитку підходів, які враховують не тільки взаємодію елементів антен по звуковому полю, але і взаємодію електричних, механічних і акустичних полів у кожному з перетворювачів у процесі перетворення енергії в них. Повне врахування перерахованих фізичних ефектів можливе лише в рамках третього підходу до розрахунку звукових полів антен, згідно з яким розв'язується єдина зв'язана задача про визначення характеристик полів із врахуванням електропружних властивостей елементів антен та впливу дифрагovanого поля на електричний відгук перетворювачів антен [1, 6].

Постановка задачі

Метою даної статті є демонстрація можливостей третього підходу при визначенні особливостей формування звукових полів криволінійними акустичними антенами, утвореними з кругових циліндричних п'єзокерамічних перетворювачів — приймачів звуку.

Вихідні положення

Дана стаття є продовженням праць [1, 6], в яких знайдено аналітичні розв'язки задач про взаємодію акустичних хвиль із криволінійними системами довільних тонких п'єзокерамічних циліндричних перетворювачів із врахуванням зв'язаності акустичних, механічних та електричних полів у кожному з перетворювачів системи та взаємного впливу елементів системи один на одного за рахунок багаторазового відбиття хвиль всіма елементами системи. Нижче

наведено результати чисельних досліджень фізичних характеристик акустичних, механічних та електричних полів, які створюються дуговими антенними решітками з акустичними екранами локально реагуючих типів та без них при їх взаємодії з плоскими хвилями, що падають на решітки, аналіз та узагальнення одержаних результатів і встановлення фізичних закономірностей цієї взаємодії.

Уявімо, що плоска акустична хвиля падає на криволінійну систему, яка складається з довільної кількості N нескінченнодовгих паралельних тонких циліндричних перетворювачів, внутрішні об'єми яких заповнені рідинами. У загальному випадку ці перетворювачі й рідини в них різні. Перетворювачі поляризовані в радіальному напрямку, мають суцільні електродовані покриття на зовнішніх та внутрішніх поверхнях і утворюють антенну решітку таким чином, що їх поздовжні осі розміщені на циліндричній поверхні радіуса L . У внутрішній порожнині решітки може бути розміщений циліндричний локально реагуючий акустичний екран, який у цьому випадку являє собою стовп рідини, що не перемішується із зовнішнім (відносно елементів решітки) середовищем і має відмінні від нього фізичні параметри. Вісь $N+1$ циліндра збігається з віссю антенної решітки. Два варіанти такої решітки з екраном і без екрана наведено на рис. 1. Тут же подані і системи координат, які використовуються для опису полів перетворювачів і антенних решіток.

Для систем, що розглядаються і належать до випадку плоскої деформації, бо характеристики полів циліндрів не змінюються вздовж осей циліндрів, рух тонкостінних п'єзокерамічних оболонок із врахуванням гіпотез Кірхгофа–Ляви описується системою рівнянь

$$\begin{aligned} (1 + \beta_k^2 \mu_k) \frac{\partial^2 U^{(k)}}{\partial \theta_k^2} + \frac{\partial W^{(k)}}{\partial \theta_k} - \beta_k^2 \mu_k \frac{\partial^3 W^{(k)}}{\partial \theta_k^3} - \\ - \frac{R_k^2}{c_{pk}^2} \frac{\partial^2 U^{(k)}}{\partial t^2} = 0, \quad (1) \\ \frac{\partial U^{(k)}}{\partial \theta_k} - \beta_k^2 \mu_k \frac{\partial^3 U^{(k)}}{\partial \theta_k^3} + W^{(k)} + \beta_k^2 \mu_k \frac{\partial^4 W^{(k)}}{\partial \theta_k^4} - \\ - R_k(1 + \nu_k) d_{31,k} E_r^{(k)} + \frac{R_k}{c_{pk}^2} \frac{\partial^2 W^{(k)}}{\partial t^2} = \\ = \frac{S_{11,k}^E (1 - \nu_k^2) R_k^2}{h_k} q^{(k)} \quad (k = 1, 2, \dots, N). \end{aligned}$$

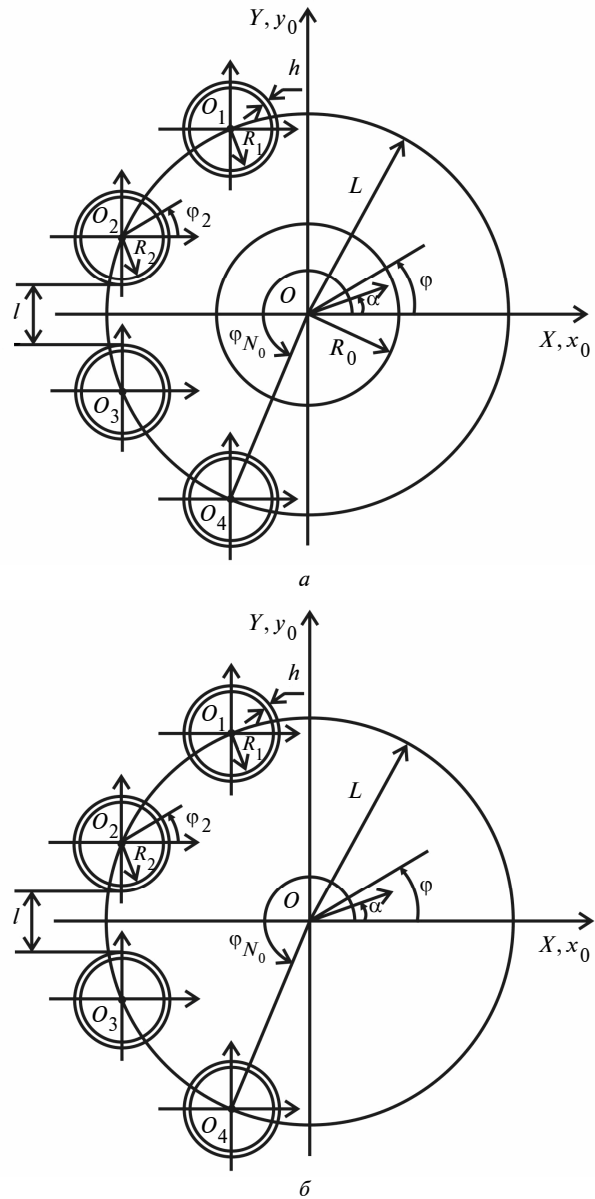


Рис. 1. Нормальні перерізи дугових решіток, утворених із кругових циліндричних перетворювачів з акустичним екраном (а) і без акустичного екрана (б) у внутрішній порожнині

Потенціали зовнішніх відносно решіток звукових полів $\varphi^{(0)}$ і звукових полів у внутрішньому об'ємі кожної оболонки $\varphi^{(i)}$ ($i = 1, \dots, N$) та в акустичному екрані $\varphi^{(N+1)}$ задовольняють хвильові рівняння, записані у відповідних координатах:

$$\frac{\partial^2 \varphi^{(0)}}{\partial r_k^2} + \frac{1}{r_k} \frac{\partial \varphi^{(0)}}{\partial r_k} + \frac{1}{r_k^2} \frac{\partial^2 \varphi^{(0)}}{\partial \theta_k^2} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \varphi^{(0)}}{\partial t^2},$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \varphi^{(k)}}{\partial r_k^2} + \frac{1}{r_k} \frac{\partial \varphi^{(k)}}{\partial r_k} + \frac{1}{r_k^2} \frac{\partial^2 \varphi^{(k)}}{\partial \theta_k^2} &= \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \varphi^{(k)}}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial^2 \varphi^{(N+1)}}{\partial r_0^2} + \frac{1}{r_0} \frac{\partial \varphi^{(N+1)}}{\partial r_0} + \frac{1}{r_0^2} \frac{\partial^2 \varphi^{(N+1)}}{\partial \theta_0^2} &= \\ = \frac{1}{c_{N+1}^2} \frac{\partial^2 \varphi^{(N+1)}}{\partial t^2} \quad (k=1, 2, \dots, N). \end{aligned} \quad (2)$$

Значення тиску в звукових полях, що входять до рівняння (1), із врахуванням потенціалу падаючого поля ψ визначаються співвідношеннями

$$\begin{aligned} q^{(k)} &= [-P^{(0)} + P^{(k)}]_{r_k=R_k} \quad (k=1, 2, \dots, N), \\ P^{(0)} &= -\rho_0 \frac{\partial [\varphi^{(0)} + \psi]}{\partial t}, \quad P^{(k)} = -\rho_k \frac{\partial \varphi^{(k)}}{\partial t}. \end{aligned} \quad (3)$$

У наведених рівняннях $W^{(k)}$, $U^{(k)}$ — нормальні і тангенційні складові вектора зміщень точок серединної поверхні кожної оболонки; $E_r^{(k)}$ — напруженість електричного поля, що виникає в ній.

Геометричні і фізичні параметри в коефіцієнтах системи (1) визначаються виразами

$$\begin{aligned} \beta_k^2 &= \frac{h_k^2}{12 R_k^2}, \quad \mu_k = 1 + \frac{1 + \nu_k}{2} \frac{k_{Pk}^2}{1 - k_{Pk}^2}, \\ c_{Pk}^2 &= \frac{1}{\gamma_k S_{11,k}^E (1 - \nu_k^2)}, \quad k_{Pk}^2 = \frac{2}{1 - \nu_k} \frac{d_{31,k}}{S_{11,k}^E \varepsilon_{33}^T}, \end{aligned}$$

де $S_{11,k}^E$, ν_k , $d_{31,k}$, ε_{33}^T — модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, п'єзомодуль і електрична проникливість матеріалу k -го перетворювача; k_{Pk} — його планарний коефіцієнт електро механічного зв'язку; γ_k — густина п'єзокераміки; h_k, R_k — товщина і радіус серединної поверхні відповідної оболонки; c_0, ρ_0 і c_k, ρ_k — швидкість звуку і густина зовнішньої і внутрішніх акустичних середовищ; t — час. Потенціал швидкості хвилі, що падає під кутом α (див. рис. 1), запишемо у вигляді

$$\psi(r_k, \theta_k, t) = Qe^{-i\omega t + i\frac{\omega}{c_0}[L \cos(\theta_{k0} - \alpha) + r_k \cos(\theta_k - \alpha)]}, \quad (4)$$

$$\psi(r_0, \theta_0, t) = \psi(r_{N+1}, \theta_{N+1}, t) = Qe^{-i\omega t + i\frac{\omega}{c_0}r_0 \cos(\theta_0 - \alpha)}.$$

Вихідну систему рівнянь (1)–(4) доповнимо граничними умовами, що забезпечують безвідривний контакт перетворювачів з акустичними середовищами та зовнішнього середовища з акустичним екраном:

$$\begin{aligned} \frac{\partial W^{(k)}}{\partial t} &= \frac{\partial [\varphi^{(0)} + \psi]}{\partial r_k} \Big|_{r_k=R_k}, \\ \frac{\partial W^{(k)}}{\partial t} &= \frac{\partial \varphi^{(k)}}{\partial r_k} \Big|_{r_k=R_k}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial [\varphi^{(0)} + \psi]}{\partial r_{N+1}} \Big|_{r_{N+1}=R_{N+1}} &= \frac{\partial \varphi^{(N+1)}}{\partial r_{N+1}} \Big|_{r_{N+1}=R_{N+1}}, \\ \rho_0 \frac{\partial [\varphi^{(0)} + \psi]}{\partial t} \Big|_{r_{N+1}=R_{N+1}} &= \rho_{N+1} \frac{\partial \varphi^{(N+1)}}{\partial t} \Big|_{r_{N+1}=R_{N+1}}. \end{aligned}$$

Розв'язання поставленої задачі може бути здійснено для різних варіантів комутації електродів перетворювачів (електричних граничних умов):

електроди закорочені

$$E_r^{(k)} = 0; \quad (6)$$

електроди розімкнуті ($a=0$) або замкнуті ($a=1$) через опір навантаження $z_H^{(k)}$:

$$I^{(k)} = \frac{a E_r^{(k)} h_k}{z_H^{(k)}}, \quad (7)$$

де $I^{(k)}$ — динамічний струм зміщення в п'єзокераміці на одиницю довжини оболонки:

$$\begin{aligned} I^{(k)} &= -\frac{\partial}{\partial t} \left\{ \int_0^{2\pi} \varepsilon_{33}^T (1 - k_{Pk}^2) E_r^{(k)} + \right. \\ &+ \left. \frac{d_{31}}{S_{11}^E (1 - \nu_k)} \left(\frac{1}{R_k} \frac{\partial U^{(k)}}{\partial \theta_k} + \frac{W^{(k)}}{R_k} \right) \right\} R_k d\theta_k. \end{aligned} \quad (8)$$

Наведені рівняння (1)–(8), доповнені умовами випромінювання, утворюють повну систему, розв'язання якої дає можливість комплексно дослідити властивості всіх задіяних у процесі фізичних полів — акустичних, механічних і електричних.

Основні розрахункові співвідношення

Вирази для зміщень оболонок та для потенціалів звукових полів знаходяться у вигляді

рядів Фур'є по окружних координатах [1]. Задовольнивши умови, що забезпечують безвідривний контакт поверхонь оболонок і екрана з акустичними середовищами, та скориставшись теоремою складання для циліндричних хвильових функцій, для визначення коефіцієнтів вказаних рядів одержимо нескінченну систему лінійних алгебричних рівнянь відносно невідомих сталих розкладу полів у ряди Фур'є, яка має вигляд

$$\begin{aligned} A_n^{(k)} + \sum_{j=0}^N \sum_{m=-\infty}^{\infty} F_{nm1}^{(kj)} A_m^{(j)} + G_{n1}^{(k)} B_n^{(k)} &= Q U_{n1}^{(k)}, \\ G_{n2}^{(k)} A_n^{(k)} + \sum_{j=0}^N \sum_{m=-\infty}^{\infty} F_{nm2}^{(kj)} A_m^{(j)} + B_n^{(k)} &= Q U_{n2}^{(k)} \\ (k=1, 2, \dots, N), \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} A_n^{(0)} + \sum_{j=1}^N \sum_{m=-\infty}^{\infty} F_{nm1}^{(0j)} A_m^{(j)} + G_{n1}^{(0)} B_n^{(N+1)} &= Q U_{n1}^{(0)}, \\ G_{n2}^{(0)} A_n^{(0)} + \sum_{j=1}^N \sum_{m=-\infty}^{\infty} F_{nm2}^{(0j)} A_m^{(j)} + B_n^{(N+1)} &= Q U_{n2}^{(0)}. \end{aligned}$$

У праці [1] показано, що визначник нескінченної системи типу (9) є визначником нормального типу, а сама система має єдиний розв'язок, який може бути одержано методом редукції. За рахунок збільшення порядку скорочення системи можна виконувати розрахунки з точністю, яка контролюється. Після обчислення сталих розкладу в ряди Фур'є визначаються всі необхідні фізичні характеристики динамічного процесу. Нижче наведено формули, за якими в подальшому здійснювались розрахунки фізичних полів вибраних варіантів побудови антенних решіток.

Обчислення нормальної складової до поверхні вектора зміщень $W^{(k)}(\theta)$ здійснюється за формулою

$$W^{(k)} = e^{-i\omega t} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\lambda_{nk}^{(1)} \lambda_{nk}^{(5)}}{\lambda_{nk}^{(1)} \lambda_{nk}^{(4)} + \lambda_{nk}^{(2)} \lambda_{nk}^{(3)}} q_n^{(k)} e^{in\theta_k}, \quad (10)$$

де

$$\begin{aligned} q_n^{(k)} &= i\omega \left\{ \rho_0 \left[A_n^{(k)} H_n^{(1)} \left(\frac{\omega}{c_0} R_k \right) + \right. \right. \\ &+ \sum_{j=1}^{N+1} \sum_{m=-\infty}^{\infty} A_m^{(j)} H_{m-n}^{(1)} \left(\frac{\omega}{c_0} L_{kj} \right) J_n \left(\frac{\omega}{c_0} R_k \right) e^{i(m-n)\theta_{kj}} + \end{aligned}$$

$$\left. + Q e^{i \frac{\omega}{c_0} L \cos(\theta_{k0} - \alpha)} i^n J_n \left(\frac{\omega}{c_0} R_k \right) - \rho_k B_n^{(k)} J_n \left(\frac{\omega}{c_k} R_k \right) \right\}.$$

Акустичний тиск у ближньому полі антени на зовнішній поверхні $r_k = R_k$ k -го перетворювача можна обчислити за виразом

$$\begin{aligned} P_6^0(t, \theta_k, \varphi_k) &= \\ &= e^{-i\omega t} \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n^{(k)} H_n^{(1)} \left(\frac{\omega}{c_0} R_k \right) e^{in\theta_k} + \right. \\ &+ \sum_{i=1}^{N+1} \sum_{m=-\infty}^{\infty} A_m^{(i)} H_{m-n}^{(1)} \left(\frac{\omega}{c_0} L_{ki} \right) \times \\ &\times J_n \left(\frac{\omega}{c_0} R_k \right) e^{i(m-n)\theta_{ki}} e^{im\theta_i} + \\ &+ Q e^{i \frac{\omega}{c_0} L \cos(\theta_{k0} - \alpha)} \times \\ &\times \sum_{n=-\infty}^{\infty} i^n J_n \left(\frac{\omega}{c_0} R_k \right) e^{-in\alpha} e^{in\theta_k} \left. \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

Електрична напруга $U^{(k)}$ на електродах k -го перетворювача, замкнутих через опір навантаження $z_H^{(k)}$, обчислюється за формулою

$$\begin{aligned} U^{(k)} &= \\ &= - \frac{i2\pi h_k d_{31,k} z_H^{(k)} \lambda_{0k}^{(1)} \lambda_{0k}^{(5)} q_0^{(k)}}{S_{11,k}^E (1 - \nu_k) R_k [h_k - i2\pi\omega \varepsilon_{33}^T (1 - k_{pk}^2) z_H^{(k)}]} \times \\ &\times \frac{1}{(\lambda_{0k}^{(1)} \lambda_{0k}^{(4)} + \lambda_{0k}^{(2)} \lambda_{0k}^{(3)})}. \end{aligned} \quad (12)$$

Вирази для визначення коефіцієнтів у формулах (10)–(12) наведено в праці [1].

Вирази (1)–(12) дають можливість знайти чисельні значення різних фізичних полів, що діють у криволінійних антенних решітках, для різних цікавих окремих випадків. Якщо в наведених співвідношеннях покласти $\rho_{N+1} c_{N+1} = \rho_0 c_0$, то одержимо формули для обчислення фізичних полів криволінійних решіток без екранів. У випадку, коли в наведених виразах опустити суми від 1 до N , надаючи k одне з фіксованих значень у цьому діапазоні, отримаємо формули для знаходження фізичних полів окремого перетворювача, розміщеного поблизу акустичного екрана.

Аналіз результатів розрахунків

Використаємо одержані аналітичні вирази (9)–(12) для встановлення фізичних закономірностей формування акустичних, механічних та електричних полів, які створюються двома типами дугових циліндричних антен – з акустичним екраном (рис. 1, *а*) і без нього (рис. 1, *б*) при збудженні їх плоскими хвилями. В конкретних розрахунках кожна з антен утворена з чотирьох ($N = 4$) однакових заповнених повітрям кругових тонкостінних циліндричних перетворювачів із радіальною поляризацією та суцільними електродами, що нанесені на зовнішню і внутрішню поверхні оболонок перетворювачів. Всі перетворювачі мають однакові радіуси $R_k = R = 0,0675$ м і товщину $h_k = h = 0,006$ м і виготовлялись із п'єзокераміки складу ЦТБС-3 [3]. Центри нормальних перерізів перетворювачів розміщувались по колу радіусом $L = 5R$ рівномірно по дузі з відстанню між поверхнями сусідніх перетворювачів $l_0 = 0,09R$. У дуговій решітці з екраном останній розміщено у внутрішній порожнині решітки. Як акустичний екран вибрано круговий циліндр радіусом $R_{N+1} = R_e = 0,24$ м. Розглянуто два варіанти виконання екрана – у вигляді м'якого і жорсткого тіл.

Антену розміщувались у рідині з параметрами $\rho_0 = 1000$ кг/м³ та $c_0 = 1500$ м/с і збуджувались плоскими хвилями з частотами $f = 4$ кГц і $f = 10$ кГц. Резонансна частота пульсуючих коливань перетворювачів у воді становила 10 кГц, а їх електричне навантаження $z_n = 1000$ Ом. При обчисленнях кількість членів, що враховуються в розкладах полів у ряди Фур'є, вибиралась така, щоб внесок останнього члена, що враховується, не перевищував 2 % сумарного результату, який отримується.

Як оцінювані характеристики фізичних полів було вибрано: для акустичних полів – звукові тиски на поверхнях перетворювачів $P_6^{(k)}$; для механічних полів – радіальні зміщення $W^{(k)}$ поверхонь перетворювачів; для електричних полів – електричні напруги $U^{(k)}$ на виході окремих перетворювачів. Всі ці характеристики оцінювались залежно від окремих напрямків падіння на решітки плоских хвиль. У результаті чисельного моделювання було одержано великий розрахунковий матеріал та

проведено його систематизований аналіз. Найбільш цікаві результати наведено на рис. 2–5. Для того щоб виявити вплив взаємодії елементів антен по акустичному полю на формування фізичних полів різних антен, характеристики порівнюються з аналогічними характеристика-

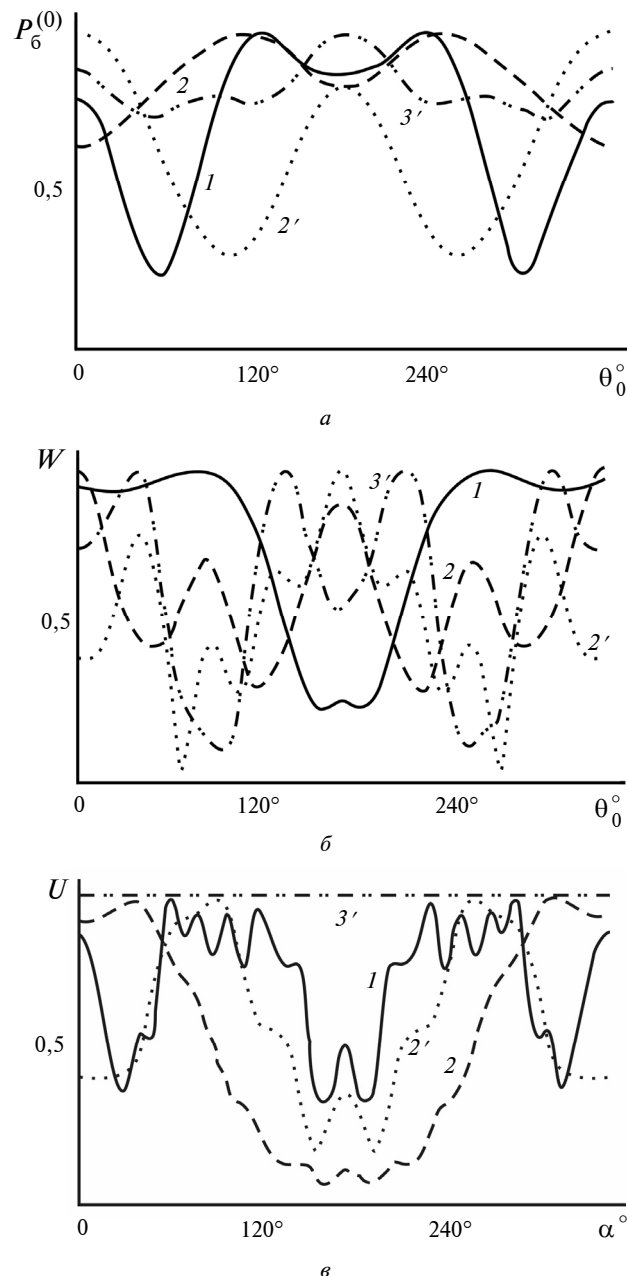


Рис. 2. Кутові залежності нормованих амплітуд модулів акустичного тиску на поверхні перетворювача (*а*), радіальних переміщень поверхні (*б*) та електричних напруг на виході перетворювача (*в*) для одиночного перетворювача при наявності м'якого (криві 1 і 2) та жорсткого (крива 2') екранів та без екрана (крива 3') при куті падіння $\alpha = 0^\circ$ (*а, б*) плоских хвиль: 1 – $f = 10$ кГц; 2, 2', 3' – $f = 4$ кГц

ми одиночного перетворювача. Таку ж мету має і прийнятий вибір частот плоских хвиль, що падають на антени, який дає можливість дослідити поведінку антен при збудженні перетворювачів як в області власної частоти їх пульсуючих коливань, так і на відстані від неї.

Результати досліджень акустичних полів.

Аналіз кривих, наведених на рис. 2–5, свідчить про те, що в криволінійних антенних решітках і з екраном, і без нього істотну роль у формуванні фізичних полів відіграє взаємодія всіх елементів антен по акустичному полю. Саме її наявністю можна пояснити істотну відмінність полів перетворювачів у складі антен (рис. 3–5) порівняно з полями перетворювачів при їх самостійній роботі (рис. 2). При цьому в антенах з екраном виникає, крім взаємодії перетворювачів між собою, ще й взаємодія між кожним із перетворювачів і акустичним екраном. Це добре видно при аналізі кривих (рис. 2, а). Порівняння кривих показує, що взаємодія акустичного екрана і кругового циліндричного перетворювача приводить до появи істотних змін у характері розподілу амплітуд тисків на поверхні перетворювача при наявності екрана порівняно з одиночним перетворювачем та значній залежності цього розподілу від ступеня жорсткості поверхні екрана. При цьому на частоті резонансу перетворювача нерівномірність поля істотно збільшується для м'якого екрана. Жорсткий екран навпаки зумовлює більшу нерівномірність поля в області низьких частот порівняно з м'яким екраном або з його відсутністю. Протилежність граничних властивостей за жорсткістю екранів проявляє себе насамперед у тому, що точки з максимальними амплітудами тиску розміщені на різних відносно екрана поверхнях перетворювачів.

Виникнення в антенних решітках при наявності акустичного екрана взаємодії не тільки між кожним із перетворювачів і екраном, але й між самими перетворювачами зумовлює подальші зміни в розподілі тисків у ближньому полі антени. Насамперед це проявляється в тому, що акустичні поля перетворювачів стають залежними від місця розміщення перетворювача в антенній решітці (рис. 3) і значною мірою відрізняються від полів одиночного перетворювача (рис. 2). Робота перетворювачів в області їх резонансної частоти істотно збільшує нерівномірність їх акустичних полів, на яку мало впливає введення до складу антени акустичного екрана. В той же час на характер розподілу неоднорідності акустичного поля і її величину

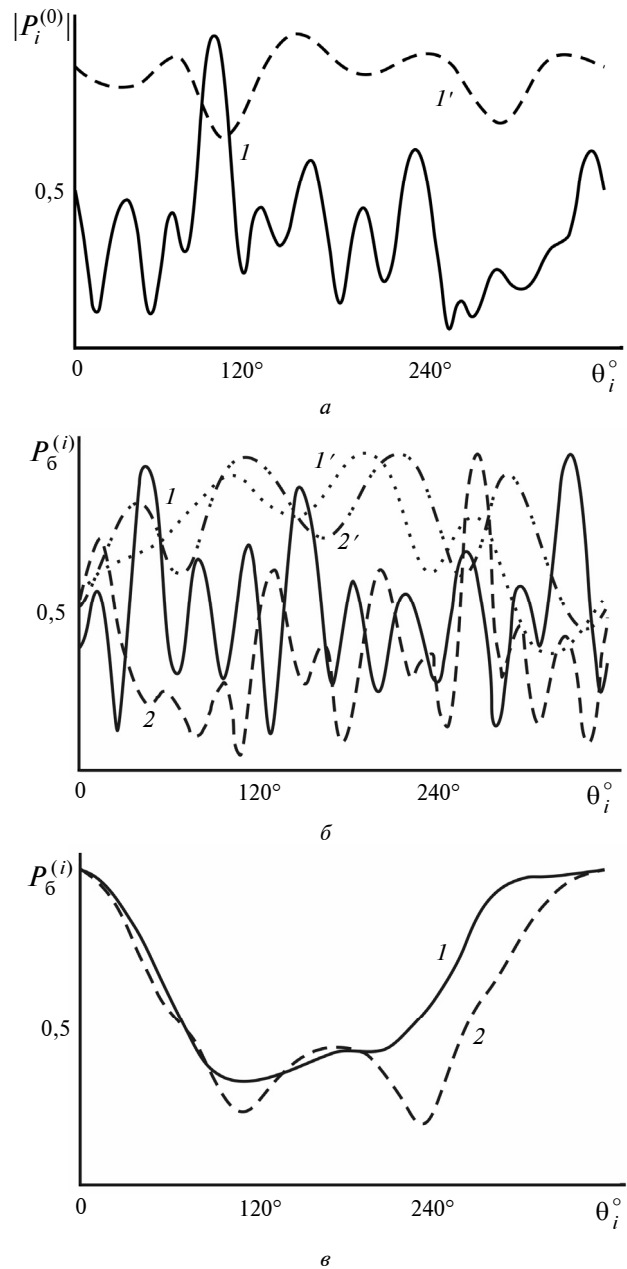


Рис. 3. Кутові залежності нормованих модулів звукових тисків на поверхні перетворювачів з номерами $i = 1$ і 2 решіток без екранів (а) та з м'яким (б) і жорстким (в) екранами на частотах 10 і 4 кГц (криві з штрихом) при $\alpha = 0^\circ$: 1 – $i = 1$; 2 – $i = 2$

для різних частот значний вплив має ступінь жорсткості екрана. При введенні до складу дугової антени жорсткого екрана значно збільшуються нерівномірність акустичного поля в області низьких частот порівняно з антенами з м'яким екраном (рис. 2, б) і без екрана (рис. 2, а), хоча при цьому поля сусідніх перетворювачів менше різняться між собою.

Результати досліджень механічних полів.

Визначимо ті переміщення (рис. 4), які зазнають поверхні перетворювачів при збудженні їх падаючими плоскими хвилями. Аналіз кривих рис. 4 свідчить про достатню складність коливань оболонок перетворювачів. Це зумовлено тим, що переміщення точок поверхонь перетворювачів являють собою суперпозицію переміщень двох типів – пружних переміщень поверхонь перетворювачів та поступальних переміщень перетворювачів у цілому як “твердих тіл”. При цьому істотну роль у формуванні характеру коливань відіграє не тільки відсутність чи наявність у складі дугової решітки акустичного екрана, але й ступінь його жорсткості.

Пружні коливання поверхонь перетворювачів є результатом суперпозиції радіальних та згинних мод коливань, причиною збудження яких є виникнення складного силового поля (див. рис. 2, а, рис. 3) при дифракції плоских звукових хвиль на дугових решітках перетворювачів. Природно, що при цьому внесок перших мод коливань є визначальним. Так, для одиночного перетворювача при падінні на нього хвиль у напрямку осі OX в області низьких частот превалюють осцилюючі коливання, про що свідчать максимальні амплітуди зміщень вздовж напрямку падіння хвиль та близькі до нуля переміщення в напрямках, нормальних до напрямку падіння плоскої хвилі.

Розміщення поблизу одиночного перетворювача акустичного екрана, яке викликає появу акустичної взаємодії між перетворювачем і екраном, значною мірою змінює картину механічного поля перетворювача (криві 1, 2, 2' рис. 2, б). Якщо в області резонансної частоти перетворювача ($f = 10$ кГц) при $\alpha = 0^\circ$ характер розподілу коливань по поверхні одиночного перетворювача при наявності м'якого екрана (крива 1) набуває форму “кардіоїди”, то в області низьких частот (крива 2) розподіл залишається близьким до осцилюючого. При цьому під “кардіоїдним” типом коливань будемо розуміти такі коливання, при яких на одній половині перетворювача превалюють максимальні значення, а на іншій – мінімальні і різниця між ними досить велика.

Перехід до дугових решіток перетворювачів, який зумовлює появу ще й акустичної взаємодії перетворювачів решітки між собою, істотно ускладнює (див. рис. 4) коливальний процес поверхонь кожного з перетворювачів, оскільки в силу достатньо сильної взаємодії перетворювачів у складі решіток, крім складової осциляції вздовж осі OX , виникає і друга складова ос-

циляції вздовж осі OY і обидві складові порівнянні між собою. Це ускладнення проявляє себе у збільшенні кількості піків максимальних зміщень. При цьому якщо для дугових решіток без екрана (рис. 4, а) і з м'яким екраном (рис. 4, б) механічні коливання перетворювачів можна визначити як близькі до осцилюючих, то для решіток з жорстким екраном (рис. 4, в) – як близькі до “кардіоїдного” типу.

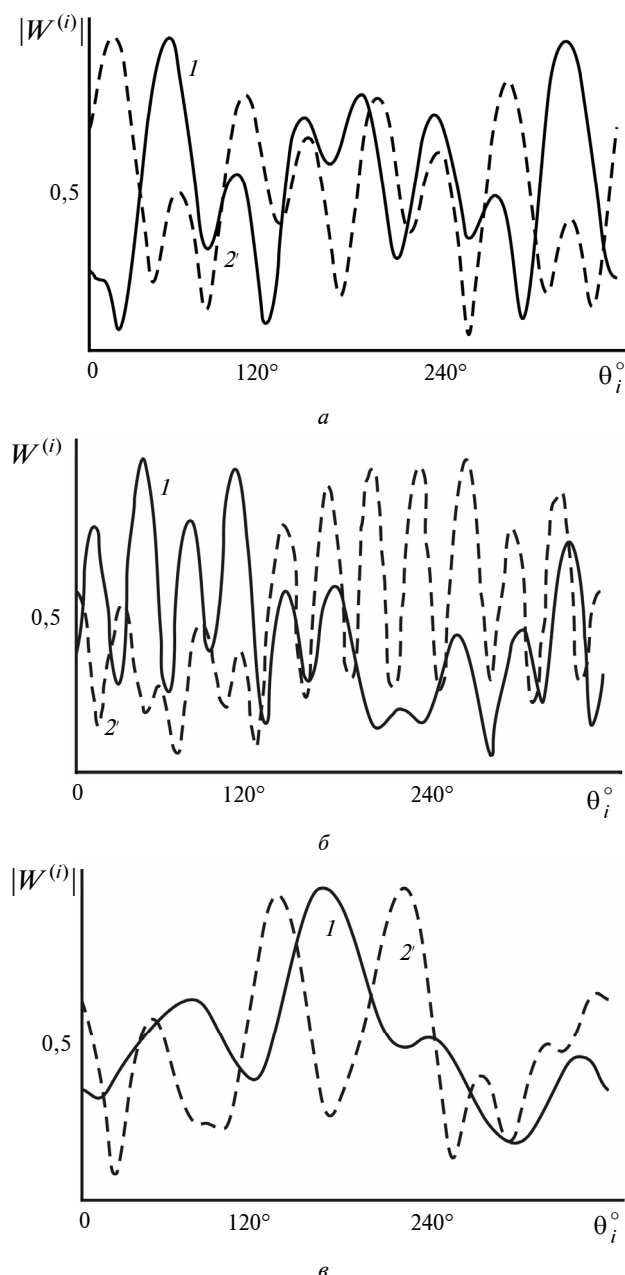


Рис. 4. Кутові залежності нормованих модулів радіальних зміщень поверхонь перетворювачів з номерами $i = 1, 2$ решіток без екранів (а) та з м'яким (б) і жорстким (в) екранами на частоті 4 кГц при $\alpha = 0^\circ$: 1 – $i = 1$; 2 – $i = 2$

Результати досліджень електричних полів.

Якщо з точки зору механічних і акустичних полів перетворювачі належать до систем із розподіленими параметрами, оскільки їх розміри порівнянні з довжиною механічних хвиль, то з точки зору електричних полів перетворювачі є системами із зосередженими параметрами, бо їх розміри істотно менші за довжину електричних хвиль. У зв'язку з цим можна визначити лише залежності електричних полів перетворювачів від кута падіння на решітки плоских хвиль. Ці залежності є діаграмами направленості перетворювачів у режимі прийому звукових хвиль. Із фізичних міркувань ясно, що електрична напруга на виході одиночного перетворювача (див. рис. 2, в) не залежить від кута падіння плоских хвиль. Аналіз кривих на рис. 2, в дає можливість встановити, яким чином порушується ця закономірність у зв'язку з появою акустичної взаємодії між перетворювачем і екраном. Це порушення проявляється в тому, що у перетворювача виникає властивість просторової вибірності з істотно різними рівнями діаграм направленості вздовж осі OX . Крім того, на високих частотах при наявності м'якого екрана (крива 1) і на низьких частотах при жорсткому екрані (крива 2) діаграма направленості перетворювача може роздвоюватись.

Перехід від одиночного перетворювача до дугової решітки з них зумовлює, як вже вказувалось, появу акустичної взаємодії перетворювачів між собою. Для електричного поля перетворювачів у дуговій решітці без екрана (рис. 5, а) поява цієї взаємодії супроводжується порушенням симетрії діаграми направленості кожного перетворювача відносно лінії OO_k (див. рис. 1) та значною залежністю діаграм від місця розташування перетворювачів у решітці. Навіть при відсутності акустичного екрана кутова залежність електричної напруги на виході крайніх перетворювачів при роботі їх у дуговій решітці набуває властивості однонаправленості.

Введення до складу дугової решітки м'якого екрана (рис. 5, б) істотно збільшує взаємодію перетворювачів між собою в області резонансних частот нульової моди і зумовлює значні зміни (криві 1, 2) їх діаграм направленості. При зниженні робочих частот у решітках з м'яким екраном (криві 1' і 2' рис. 5, б), а в решітках з жорстким екраном (рис. 5, в) на всіх частотах взаємодія між перетворювачами решітки істотно слабшає.

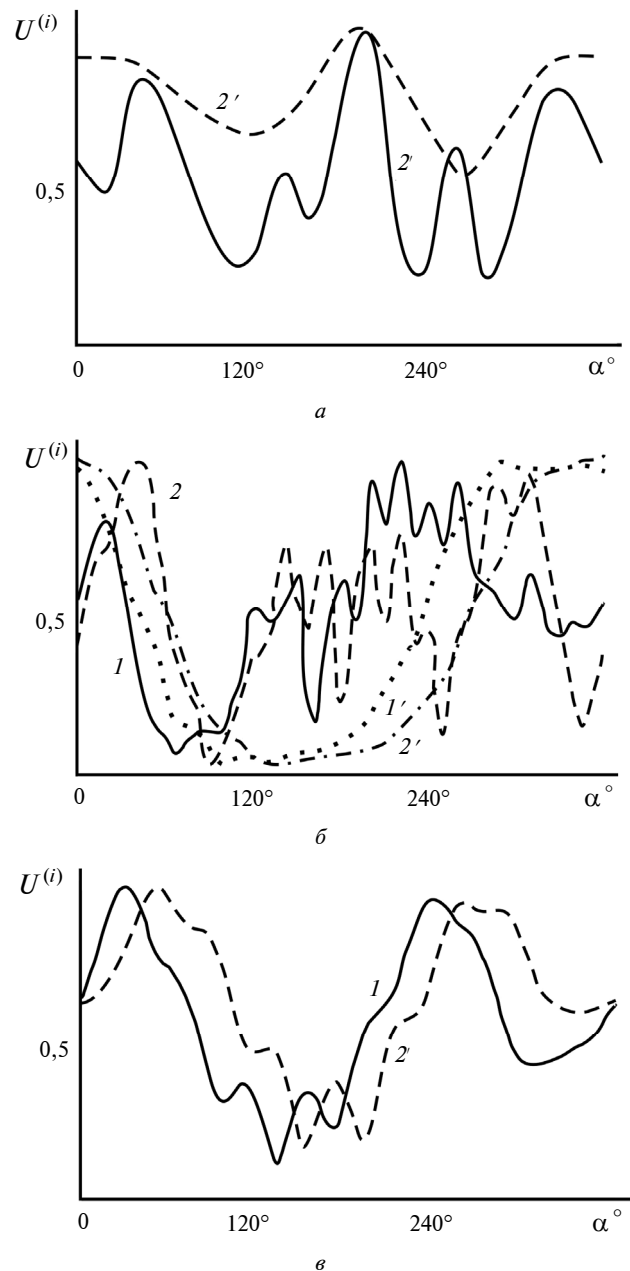


Рис. 5. Залежність нормованих електричних напруг на виході одиночних перетворювачів $i = 1, 2$ у складі решіток без екрана (а) та з м'яким (б) і жорстким (в) екранами на частотах 10 і 4 кГц (позначення із штрихом) від кута приходу α плоских хвиль на решітку: 1, 1' – $i = 1$; 2, 2' – $i = 2$

Висновки

Формування полів різної фізичної природи в криволінійних антенних решітках, утворених з п'єзокерамічних циліндричних перетворювачів, здійснюється в дугових решітках з акустичним екраном двома видами взаємодії

тіл по акустичному полю — взаємодією між перетворювачами і екраном і взаємодією між самими перетворювачами, а без екрана — тільки другим видом. Встановлено, що превалюючу роль у формуванні полів має взаємодія між перетворювачами і екраном, яка для локально реагуючого екрана проявляється у всьому діапазоні частот. Вплив же взаємодії перетворювачів найбільшу силу має в області їх резонансних частот. При цьому її дія на поля, що формуються, значно менша в дугових решітках з екраном.

У криволінійних антенних решітках механічні поля перетворювачів являють собою накладення на пружні переміщення поверхонь їх оболонок поступальних переміщень перетворювачів як "твердих" тіл. Введення до складу

решіток екранів істотно змінює механічні поля перетворювачів порівняно з решітками без екранів. Зокрема, якщо для дугових решіток з м'яким екраном коливання перетворювачів можна визначити як осцилюючі, то для таких самих решіток із жорстким екраном їх слід віднести до коливань "кардіоїдного" типу.

Введення до складу криволінійної решітки акустичного екрана підсилює кутову нерівномірність електричних полів перетворювачів порівняно з такою ж решіткою без екрана.

Подальший розвиток наведених досліджень планується спрямувати в напрямі врахування впливу акустичних екранів, виконаних у вигляді електропружних або пружних тіл. Таке модельне уявлення акустичних екранів є найбільш адекватним існуючим фізичним реаліям.

В.С. Дидковский, А.Г. Лейко, И.В. Кандрачук

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЕЙ КРИВОЛИНЕЙНЫМИ АКУСТИЧЕСКИМИ АНТЕННАМИ, ОБРАЗОВАННЫМИ ИЗ КРУГОВЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ПРИЕМНИКОВ ЗВУКА

Выполнены исследования связанных полей различной физической природы, возникающих в дуговых цилиндрических решетках, образованных из тонкостенных цилиндрических пьезокерамических преобразователей с локально реагирующими акустическими экранами во внутренней полости и без них, при взаимодействии решеток с плоскими акустическими волнами, в зависимости от параметров преобразователей, решеток и волн. Установлены закономерности влияния этого взаимодействия на особенности формирования акустических, механических и электрических полей преобразователями решеток.

V.S. Didkovskyi, O.G. Leyko, I.V. Kandrachuk

THE SPECIFICITY OF FORMING THE FIELDS WITH CURVED LINE ACOUSTIC AERIAL MADE OF ROUND CYLINDRICAL PIESOCERAMIC SOUND RECEIVER

This paper presents the research results of the connected fields of different physical nature that appear in the arch cylindrical lattice. This lattice is made of the thin wall cylindrical piesoceramical transformations with locally responding acoustic screens in the inner cavity and without them. The fields appear at the interaction between lattices and flat acoustic waves and depend on the parameters of transformations, lattices and waves. Finally, we determine the regularities of influence of this interaction on the specificity of acoustic, mechanical and electric fields formation by the lattice transformations.

1. Лейко А.Г., Тамарин Ю.Е., Ткаченко В.П. Подводные акустические антенны. Методы расчета звуковых полей. — К.: Аванпост прим, 2000. — 320 с.
2. Дидковский В.С., Лейко О.Г., Савін В.Г. Электроакустичні п'єзокерамічні перетворювачі (розрахунок, проектування, конструювання). — Кіровоград: Імекс-ЛТД, 2006. — 448 с.
3. Смаришев М.Д. Направленность гидроакустических антенн. — Л.: Судостроение, 1973. — 278 с.
4. Шендеров Е.Л. Волновые задачи гидроакустики. — Л.: Судостроение, 1972. — 348 с.
5. Грінченко В.Т., Вовк І.В., Маципура В.Т. Основы акустики. — К.: Наук. думка, 2007. — 640 с.
6. Кандрачук И.В. Взаимодействие плоских акустических волн с криволинейной системой, образованной из цилиндрических пьезокерамических преобразователей и экрана конечной звукопрозрачности // Электроника и связь. — 2007. — № 2. — С. 72–78.